

MAPNR-DGIIA  
Dirección de Hidrología  
División de Hidrometeorología  
Dpto. de Investigaciones Hidroclimáticas

PROCESOS DE EROSION  
SEDIMENTACION Y LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE

Reproducido con fines docentes por  
la Fundación C.I.A.R.A. 1980

David Pérez Hernández

## PROCESOS DE EROSION - SEDIMENTACION Y LOS SISTEMAS DE TRANSPORTE

### INTRODUCCION:

Las formas resultantes del relieve terrestre son consecuencia de la acción combinada de procesos de desgaste por los agentes dinámicos y químicos de la atmósfera e hidrósfera y de la acción de fuerzas internas del planeta, que producen sobre la corteza plegamientos y empujes, originando las cadenas montañosas y los continentes. Mientras que unos y otros tienen relación con la acción y mecanismos climatológicos y geológicos, es de reconocer la importancia que tienen estos aspectos sobre el modelado de las formas, alteración de las rocas, suelos y procesos de transporte.-

Dos de los primeros que han ejercido la acción sobre la corteza superficial del planeta a través de su evolución geomórfica en el tiempo, son los conocidos como meteorización o intemperismo y el de erosión. El primero consiste en la alteración física o química de los materiales de la corteza terrestre por agentes tales como el agua, hielo y componentes químicos de la atmósfera, mientras que el proceso de erosión implica las fases de recoger y transportar los materiales resultantes de esa alteración por los mencionados agentes. Es prácticamente imposible separar los estados de transición o límites en que se procesan ambos mecanismos, en general estos se complementan y actúan en la naturaleza simultáneamente.-

Dos formas de meteorización son conocidas; la mecánica o desintegración, que produce el fracturamiento y ruptura de las rocas, sin que cambie su composición original, y la química que lleva a la formación de nuevos minerales a partir de los existentes en la roca primitiva.-

Entre los primeros pueden mencionarse las producidas por la expansión térmica debido al calentamiento y enfriamiento sucesivo de las capas más externas de las rocas, siendo éste más activo cuando las fluctuaciones de temperatura ocurren en períodos de corta duración tal como acontece en zonas de climas áridos y desérticos, aunque los cambios resultantes reflejan la acción de tales agentes actuando durante largos períodos de tiempo. Las formas redondeadas y dómicas observadas en rocas graníticas y gneísicas del basamento del Escudo de Guayana, reflejan la acción de procesos de este tipo; en las regiones semi-áridas de Lara y Falcón, este mecanismo es determinante sobre la formación y estabilidad de los suelos.-

....//....

Otra forma de desintegración de las rocas es la causada por el congelamiento del agua en los poros e intersticios de las rocas, lo cual produce expansión volumétrica del agua al congelarse ( $\cong 10\%$  de su volumen) originándose tensiones que producen su ruptura, agrietamiento, exfoliación, desintegración granular o fracturamiento.-

Algunos investigadores han dado poca importancia a este mecanismo, pero es indudable que su efecto es muy importante en zonas de climas tipo tundra y/o de páramo, como en las altas cumbres de los Andes nuestros y en general sobre las grandes extensiones de tierras continentales cubiertas de nieve. De otra parte, enormes depósitos parcialmente estabilizados en el presente, tales como conos de piedemonte, terrazas fluvio-glaciales, abanicos fluviales, depósitos de laderas y otros, experimentaron originalmente procesos de este tipo, que controlaron la alteración de la roca parental y la estabilidad de los depósitos.-

Otra forma de alteración física de los suelos y rocas es el causado por la acción directa de la lluvia, granizadas, meteoritos y otros cuerpos que coliden con la superficie terrestre. La energía cinética adquirida por las gotas de lluvia durante la fase de precipitación depende de su velocidad y tamaño, además de la cantidad total y a menos que el suelo superficial esté protegido por una efectiva vegetación u cobertura, el volumen de suelo removido por el impacto directo, puede ser considerablemente alto.-

Estimaciones burdas\* de la energía total transmitida por las gotas de lluvia a un suelo o superficie expuesta a su acción directa, lleva a resultados sorprendentes. Una gota de lluvia con un diámetro de 0,25 mm y con una velocidad terminal de caída de 7 m/seg. es capaz de elevar partículas de suelo con este tamaño hasta cerca de 2 metros de altura; cálculos tentativos basados en la cantidad de lluvia total sobre un área por ejemplo; indican que, en una región donde caen anualmente 1.500 mm sobre una milla cuadrada, la energía disipada por impacto, es equivalente a la explosión de 20.000 toneladas de TNT; energía similar a la producida por la explosión de la bomba atómica que destruyó a Hiroshima.-

Las raíces de plantas y los organismos vivos ejercen tensiones y perturbaciones de los suelos y rocas que pueden ser considerados como casos de desintegración. En resumen, la alteración física implica la ocurrencia de esfuerzos en las rocas o suelos generados mediante el crecimiento de cristales de hielo, arrastre, calentamiento o enfriamiento, fijación de humedad o desecación y actividad de organismos. Debido a que fuerzas de tan diversa naturaleza y origen pueden actuar simultáneamente, -

\* Admitiéndose que la energía cinética de una gota de agua con masa m y una velocidad terminal V se trasmite por impacto elástico a una partícula de suelo con igual masa, es posible conocer la altura h de elevación alcanzada por ésta última:

$$\frac{1}{2} m v^2 = mgh \dots\dots\dots (a)$$

Cuales restricciones en la naturaleza hacen que esto no se verifique ?.

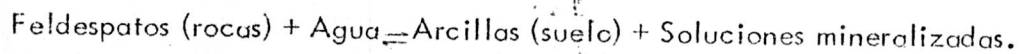
se hace difícil evaluar sus influencias particulares y el grado de interacción.-

La alteración química de los componentes de suelos y rocas se produce debido a la acción de los gases químicamente activos de la atmósfera, de las aguas y - sustancias ácidas en ellas disueltas ya sean de origen mineral o de síntesis orgánica.-

Las aguas subterráneas por ejemplo, se acidifican al asimilar el anhídrido carbónico del aire y formarse ácido carbónico que junto con otros compuestos de naturaleza ácida, (materia orgánica en descomposición) favorecen la disolución de rocas formadas por minerales solubles o de fácil alteración como son las calizas, dolomias, mármoles, areniscas feldespáticas, otras sales minerales como el yeso son altamente solubles y en general, el proceso de escorrentía en fisuras y fracturas de las rocas, hace que estas aumenten progresivamente hasta formarse depresiones y cavernas por subsidencia y/o disolución tal como las enormes depresiones cilíndricas de la meseta de Sarisariña Alto Caura (meseta de Hawa) además de otras formas como son galerías, túneles y grutas. Este tipo de relieve, cuando se desarrolla en zonas calcáreas, se conoce como topografía Karstica; en Venezuela existen numerosas cavernas y cuevas como la del Guácharo en el Estado Monagas, que evidencian la acción de este mecanismo erosivo.-

El agua asimilada a la estructura de los compuestos minerales, conduce a la formación de hidróxidos y silicatos hidratados, mediante reacciones de hidrólisis - donde el agua actúa, además de solvente como reactivo químico sobre los constituyentes minerales, tales como los feldespatos de rocas granítico-gneisicas, los cuales son alterados a arcillas y caolines en un trascendente e importante proceso responsable de la formación de los suelos, esto permite la sustentación de la vida en la tierra.-

La reacción en una forma simple puede expresarse en la siguiente forma:



Bajo forma soluble los ríos transportan componentes de muy diversa naturaleza condicionando el carácter físico-químico de las aguas.- En algunos ríos el suministro de sustancias resultantes de la actividad biológica y de descomposición de la materia orgánica pueden dar características muy particulares a las aguas tales como cambios en el Ph, turbiedad, ello en asociación a la presencia de diversos compuestos minerales y el ambiente hidrologico y geoquímico, pueden hacer más activo la acción de las aguas sobre las rocas y suelos.

Este mecanismo es muy importante en nuestras regiones tropicales donde debido a las condiciones climáticas, naturaleza composicional y estructura de las rocas expuestas superficialmente, las profundidades de la zona de alteración pueden alcanzar hasta centenas de metros.-

La oxidación de compuestos de hierro, manganeso y otros elementos conduce a sus transformaciones con ocurrencia de cambios en la coloración de los suelos y rocas, también la carbonatación debida a la acción de ácido carbónico y otros de compleja naturaleza orgánica, producen acidez en las aguas de infiltración y escorrentía, que hacen más efectiva la descomposición de los minerales componentes de las rocas, estos tres últimos procesos por ejemplo, son los más importantes reguladores de la alteración de las rocas del basamento y de cobertura superficial de la Guayana Venezolana.-

## E R O S I O N

Después que la roca o suelo ha sido alterada, actúan los agentes dinámicos como el agua y el aire para recoger las partículas y fragmentos y transportarlas hasta los diferentes ambientes de deposición. Esta fase está directa o indirectamente gobernada por la acción de la fuerza de gravedad, esto es por la acción de un gradiente de energía.-

Los deslizamientos, corrientes fluviales, glaciales y asentamiento de materiales implican el desplazamiento de masas de materiales de acuerdo a gradientes topográficos, hidráulicos, ó de presión existentes entre dos zonas de diferente posición en el espacio; en el caso de las corrientes atmosféricas que actúan como agentes de erosión, el calentamiento no uniforme de las masas de aire, origina diferencias de densidades, las cuales tienden a equilibrarse mediante el establecimiento de un flujo desde las regiones de altas a bajas presiones, parte de cuya energía puede ser usada para activar el transporte desde una fuente de suministro.-

Cuando la magnitud del desplazamiento de los materiales sólidos es reducido o se produce localmente, se conoce como movimiento en masa, este tipo de movimiento es determinante en la denudación de las tierras elevadas, que lleva a bajar la altura de los continentes y también a suplir enormes volúmenes de materiales, que son posteriormente sometidos a otros procesos de erosión.-

Los movimientos gravitacionales se producen en materiales que pueden comportarse como sólidos elásticos o rígidos, como sustancias plásticas, como fluidos ó

....//....

en estados transicionales, existiendo diferentes magnitudes en cuanto a la velocidad de desplazamiento y volúmen de la masa removida, ello determina que diferentes mecanismos de transporte se produzcan bajo similares o diferentes ambientes geológicos climáticos cuando actúan los procesos dinámicos en tales materiales.-

La rapidez con que se producen estos movimientos es muy variada, dependiendo de numerosos factores. La importancia cuantitativa que tienen los procesos erosivos que ocurren muy lentamente y que son imperceptibles a nuestra observación es enorme, pues ellos operan a través de largos períodos geológicos de tiempo y conllevan a grandes transformaciones del relieve terrestre.-

Los remanentes topográficos de la serie Roraima preservados hasta el presente como "Tepuis" en todo el borde septentrional del escudo guayanés, representan los vestigios de una extensa cubierta de plataforma de 2.500-3.000 metros de espesor de sedimentos, que cubrieron un área superior a los 450.000 km<sup>2</sup>, los cuales fueron devastados por la erosión en un gran intervalo del tiempo geológico, quedando actualmente solo remanentes dispersos en la Guayana. Este proceso lento pero progresivo de los agentes de erosión, prosigue todavía en el presente.-

Los movimientos en masas de suelos y/o rocas que adquieren velocidades graduales de desplazamiento, comportándose como flujos plásticos condicionados por la presencia de humedad y otros factores, se conocen como creptación; cuando se trata de movimientos en suelos sobresaturados de humedad que experimentan alternadamente congelación del agua atrapada en sus espacios intergranulares y drenaje por deshielo, al tipo de migración se denomina solifluxión.-

Quizás por su carácter catastrófico y lo repentino del movimiento, los deslizamientos o avalanchas de masas de suelos y/o rocas son los que despiertan el mayor interés y preocupación de las personas. Estos pueden tener diversas causas (actividad sísmica, saturación del suelo, fallas geológicas activas, y urbanismo), y siempre ocurren a través de planos o superficies de debilidad en la masa del material. Los flujos de lodo son tipos de movimiento en materiales densos, que se comportan en cierta forma como masas fluídas que avanzan hacia niveles más bajos por efecto gravitacional; ocurren generalmente, en zonas montañosas de regiones áridas sujetas a intensas precipitaciones, aunque también se producen en regiones de altas precipitaciones con suelos poco cohesivos debilitados por el alto contenido de humedad o con escasa protección vegetal.-

Cuando los suelos superficiales son perturbados para urbanismo y se disponen altas pendientes en los taludes, la acción de la escorrentía superficial puede determinar condiciones críticas de estabilidad; en el mismo sentido opera la remoción

...//.....

de la vegetación natural la cual absorbe esfuerzos tensionales desarrollados en la masa de suelos, evitando que se produzcan derrumbes y deslizamientos; los observados en la zona Metropolitana de Caracas en los cerros marginales, responden fundamentalmente a estas intervenciones. Estos estados de inestabilidad se hacen gradualmente ó intempestivamente más críticos con el tiempo, bajo la acción de eventos adversos hidrológico - meteorológicos (lluvias intensas, desecación, cambios en el drenaje, etc) pudiendo alcanzar estados irreversibles de difícil y costoso control ingenieril. Una situación análoga ocurre con los cortes en altas pendientes para el trazado de vías y autopistas en suelos de gran inestabilidad en los materiales.-

### EROSION POR GLACIALES

El hielo representa actualmente un 10 por ciento de la superficie total del globo terrestre y por lo tanto su influencia como modificador del clima es importante. Esta superficie solo representa un tercio de la que abarcaron los hielos durante el último período glacial del Cuaternario, cuando los niveles marinos descendieron en 150 metros debajo del existente en el presente, causando grandes cambios escénicos en el relieve de las tierras sujetas a su acción, como consecuencia de la remoción, transporte y deposición de enormes masas de material por los glaciales; además de los efectos derivados de las variaciones en los gradientes fluviales de los sistemas de ríos, que debieron ser más pronunciados que los actuales. Nosotros vivimos aún, en la recesión de esta última edad glacial y algunas regiones del trópico por su ventajosa posición geográfica y altos niveles altitudinales fueron y son actualmente, influenciados por estos procesos de glaciación, (se ha establecido que las nieves recubrieron tierras sobre elevaciones de 3.500 msnm durante el último paroxismo glacial del cuaternario, en los Andes de Venezuela) así, gruesos depósitos de relleno en valles intermontanos de los Andes como son las terrazas de los ríos Chama, Mucujúm, Motatán y Santo Domingo etc fueron acumuladas por este mecanismo; igualmente, los sedimentos dispuestos en el piedemonte de nuestras jóvenes cordilleras como conos, terrazas y abanicos fluviales fueron suplidos por procesos de transporte donde la acción fluvio-glacial fué significativa. De forma que los glaciales al actuar como agentes de erosión han empobrecido los suelos en las zonas elevadas y enriquecido los de niveles más bajos.-

En el presente la actividad glacial en las cimas de las cordilleras andinas se encuentra en un estado recesivo, sin embargo subsisten estructuras y formas geomórficas que atestiguan su importancia en el pasado geológico.-

Un glacial se desarrolla cuando se produce acumulación de nieve a una velocidad superior a la de deshielo y la masa total recristalizada y compactada por

...//.....

la presión de sobrecarga, es sometida a un movimiento gradual por acción gravitacional. Este arrastra materiales de muy diversa constitución y con tamaños que varían desde muy finos (detritus, limos, arcillas, arena, gravas, polvo volcánico etc.) hasta enormes bloques y peñones que se desplazan embutidos formando una mezcla heterogénea y los cuales son acumulados sin desarrollarse una definida estratificación o gradación de tamaños.-

El movimiento de los glaciales no está bien comprendido aún; las velocidades de desplazamiento medidas, varían entre pocos centímetros diarios hasta 30-50 metros/día, siendo mayores las velocidades locales en la superficie y hacia el centro en comparación a sus márgenes y respecto a las zonas más profundas. En función de la respuesta o comportamiento de la masa del glacial a los esfuerzos a que se someten, estos se comportan en sus zonas profundas como sólidos plásticos en forma similar a los suelos, los cuales fluyen o se deforman proporcionalmente al esfuerzo aplicado después de excederse un valor crítico o límite, también pueden comportarse como materiales en condiciones de flujos cuasi-plásticos o cuasi-viscosos, dependiendo de la naturaleza de los materiales sólidos asimilados, condiciones topográficas y masa de glacial, contenido de agua de deshielo, densidad y grado de compactación del depósito etc.-

La morfología de los depósitos glaciales y las configuraciones que adopta el relieve en estos ambientes son muy variados y tan complejos en sus procesos evolutivos, como las observadas en otras regiones de climas distintos; existen países donde el estudio de los problemas causados por glaciales es tan importante como son para nosotros los originados en ambiente fluviales.-

Como se ha destacado que existe una gran interrelación entre estos ambientes, debe reconocerse que la reconstrucción de la historia evolutiva de áreas sujetas a glaciación y el mejor conocimiento de los principios actuales y pasados que han influido en la morfología del relieve, es un aspecto de enorme interés geológico y climatológico.-

Así, no podemos dejar de reconocer que la respuesta hidrológica de muchas cuencas, el carácter y tipo de sedimentos aportados y transportados por las corrientes fluviales y en cierta forma, la posibilidad de almacenamientos subterráneos, las estructuras y configuraciones de los valles y canales actuales, son un reflejo de como y cuales fueron los mecanismos que condicionaron su comportamiento y el ambiente en el pasado.

...//....

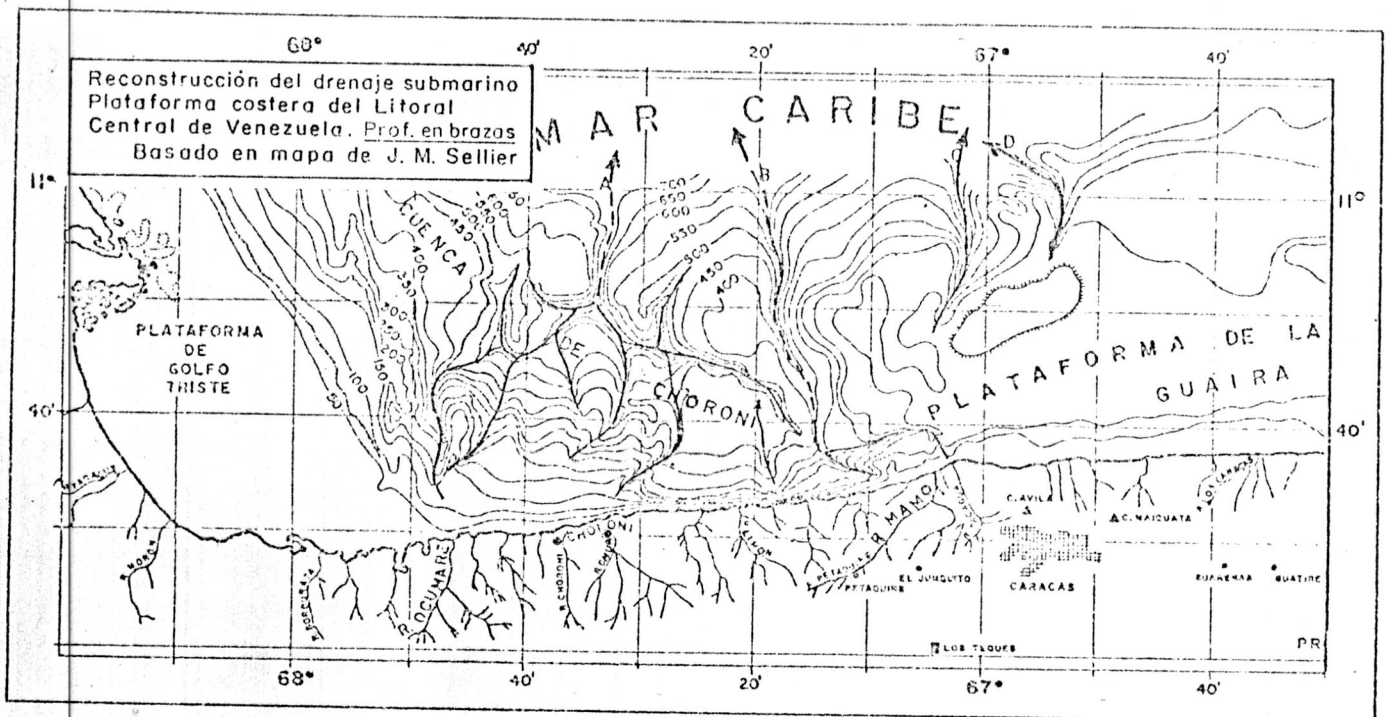
## EROSION MARINA

Los mares representan el último sitio de disposición de los sedimentos transportados desde los continentes por los cursos fluviales, las corrientes atmosféricas o glaciales, desde los mismos bordes y plataformas continentales. Estas masas oceánicas - interconectadas que abarcan el 71% de la superficie del planeta, son la fuente primaria de humedad a la atmósfera, ellos contribuyen a regular el clima, sirven de vías de comunicación, son una fuente suplidora y almacenadora de recursos energéticos y biológicos. Existen tan variadas morfologías en el relieve del fondo oceánico, como las existentes en las tierras continentales, algunas de estas formas submarinas corresponden a cadenas de montañas, conos volcánicos, mesetas, llanuras, cuencas, depresiones, cañones y gargantas similares a las observadas en las tierras superficiales, existiendo hasta desarrollo de avenamiento en los sistemas de cursos que se desarrollan sobre los valles y cañones submarinos. Explicaciones para justificar la existencia de tales formas en el relieve del fondo submarino basadas en la acción de corrientes de turbidez y la erosión por corrientes marinas costeras y sobre el fondo, se han dado y se aceptan como las más satisfactorias. Al frente de las costas de Venezuela (Litoral Central), se han descubierto cañones submarinos que responden a preexistentes sistemas de drenaje formados durante el pleistoceno, cuando la actual plataforma continental permaneció emergida; y cuyas orientaciones guardan estrecha relación con los cursos superficiales actuales como el Choroní y Ocumare. Corrientes turbídicas creadas por el suministro de sedimentos de estos sistemas fluviales costeros, favorecieron posteriormente la erosión y desarrollo de estos cañones y depresiones, que quizás se encuentran conectados con la Fosa de Bonaire más al Norte.

El movimiento de las aguas oceánicas es realmente complejo y está determinado por un gran número de factores: atracción gravitacional de otros planetas, movimiento de rotación de la tierra, variaciones de densidad del agua al existir diferencias térmicas, variación de la salinidad, terremotos, movimientos subsuperficiales de tipo gravitatorios (deslizamientos, derrumbes), afluencias de aguas continentales, configuración de la costa, vientos y otros. De los movimientos más predecibles por su condición periódica, las mareas son las más características mientras que los Tsunamis, ondas oscilatorias producidas por los terremotos y erupciones volcánicas o tormentas, son las más catastróficas e impredecibles.-

La erosión de las costas y los bordes continentales por corrientes marinas y el oleaje es intensivo, resultando de la combinación de un conjunto de procesos que implican la disipación de grandes cantidades de energía bien sea por impacto, abra -

sión y fracturamiento por arrastre de materiales sueltos, socavación por tracción del flujo sobre el fondo y disolución de las rocas (especialmente carbonáticas) por el agua. El proceso de desgaste de las costas y desarrollo de las playas, se realiza de acuerdo a un balance entre el transporte y la deposición de sedimentos. Estos pueden tener diferentes fuentes de origen como son los terrestres suplidos por los ríos, glaciales y el viento (polvos terrígenos y volcánicos etc), los de origen marino, resultantes de la actividad biológica como esqueletos de plantas y animales, también polvos volcánicos submarinos y material extraterrestre como son los meteoritos.



La comprensión de los mecanismos de erosión en las playas y costas por el mar, es un aspecto de gran interés que lleva a la selección adecuada de sitios para el emplazamiento de puertos y atracaderos, balnearios. En algunos países como Holanda, se han realizado proyectos muy interesantes de recuperación de tierras en sus costas, y en Venezuela donde ya se han ejecutado algunas obras, este aspecto cobra interés por la enorme extensión y configuración de sus costas y ambientes litorales.-

### EROSION EOLICA

El viento es un eficiente agente de erosión y su acción, particularmente en zonas de climas áridos y desérticos, es responsable del transporte y deposición de

...//.....

grandes volúmenes de sedimentos con desarrollo de un paisaje eólico típico. Una sexta parte de la superficie terrestre está ocupada por desiertos y extensiones inmensas de cuencas sedimentarias en diversas áreas continentales, fueron rellenas en el pasado por aportes acelerados de material transportado desde largas distancias; cientos de metros en espesor de Loess-un suelo de grano fino muy uniforme, con un alto índice de vacíos y fuerte cementación cuando seco; fueron transportados desde el desierto de Gobi y cubren grandes áreas continentales de China; cerca de un (1) millón de km<sup>2</sup> de la cuenca del río Mississippi está cubierta por este mismo material procedente desde los estados Nor-centrales de USA sujetos a glaciación; durante el cuaternario, extensas áreas de llanos presentan evidencias de erosión y transporte eólico, al igual que las zonas semi-áridas de Lara, Falcón y costas de la Goajira al oeste del Golfo de Venezuela.-

En estas zonas existen evidencias de la acción del viento lo que conduce a determinar típicos paisajes eólicos. Los Médanos de Coro con una extensión de 100 km<sup>2</sup> y la alta Goajira, muestran una activa dinámica de transporte y en los llanos de Guárico, Anzoátegui y Apure la actividad eólica es importante y quizás lo fue aún más en el pasado geológico, tal como se desprende de los depósitos antiguos de materiales en el subsuelo: dunas estabilizadas, erosión de formaciones sedimentarias superficiales, y cambios en las orientaciones de los sistemas de drenaje etc.-

El efecto erosivo del viento puede producirse de las siguientes formas: partículas de suelo ó roca son suspendidas y transportadas por el viento, a veces produciéndose un escogimiento selectivo con lo cual se produce un acorazamiento en el lecho o superficie del material, quedando en algunos casos remanentes de erosión preservados debido a su mayor resistencia, a este proceso se denomina deflación, mientras que si el efecto erosivo es realizado por la arena o partículas en suspensión, al mismo se conoce como abrasión o corrosión.-

Las fuentes principales de material erosionados por deflación son las playas, bahías, lagos secos, planicies y deltas fluviales, lechos secos de cauces, dunas y médanos de arena, areniscas meteorizadas, cortes de suelos y rocas, polvos o cenizas volcánicas y depósitos antiguos de cualesquiera de estos.-

El proceso de corrosión opera en general sobre rocas meteorizadas sin cubierta protectora y es más eficiente sobre las superficies de los suelos y rocas, a menudo esculpiendo irregulares y curiosas estructuras formales. Los materiales transportados por el viento, presentan un mejor escogimiento y uniforme gradación en la distribución de tamaños de las partículas, que los acarreados por otros agentes como el agua y

...//.....

el hielo. El tipo de transporte se puede realizar por saltación de las partículas lo que implica ocurrencia de un movimiento por saltos; esto es, existe un desplazamiento alternado en suspensión y de contacto, produciéndose en esta última fase, por causa del impacto, el desequilibrio de otras partículas que son incorporadas como carga de transporte, cuando se mueven por arrastre o deslizamiento a través de la interfase suelo-atmósfera se denomina arrastre por tracción.-

Tal vez debido a esta homogeneidad granulométrica de los depósitos eólicos, es que muchas personas asocian a los desiertos con enormes extensiones de arenas y gravas, cuando ellos en realidad ocupan muy reducidas áreas de los mismos, estos materiales son realmente una herramienta con la cual, el viento activado por la energía calórica suministrada por el sol, realiza su eficiente trabajo dinámico.-

## EROSION FLUVIAL

La evolución del relieve y las formas resultantes en la escultura de las cuencas hidrográficas, se realiza a través de procesos geológicos y climáticos graduales y continuos a través del tiempo que implica la erosión y el transporte de los constituyentes de la litósfera. Las corrientes fluviales por su acción, son responsables en su mayor parte de las morfologías resultantes de las tierras. Aún en las regiones más áridas del planeta, las formas topográficas reflejan el efecto de la erosión de las corrientes superficiales.-

El medio de transporte es el agua, cuya recirculación a través de la atmósfera los océanos y los continentes, lleva al concepto del ciclo hidrológico. Los ríos adquieren sus flujos de escorrentía a partir de la precipitación bien sea en forma de lluvia o nieve. El agua se incorpora a la atmósfera por evaporación desde la vegetación, superficies impermeables, cuerpos de agua y el suelo, además por transpiración a través de las plantas. Parte del agua proveniente de la precipitación se almacena temporalmente en depresiones formándose lagos y embalses o masas de hielo, experimentando evaporación o deshielo, otra parte del agua precipitada se infiltra reteniéndose o moviéndose a través de medios porosos y/o fisurados del subsuelo, originando las aguas subterráneas el resto escurre por canales, la superficie del suelo y otros contornos impermeables. En íntima asociación con estos dos últimos procesos del ciclo hidrológico se desarrolla por la escorrentía superficial el proceso de la erosión, el cuál además está influenciado por muchos factores, que se interrelacionan entre sí para determinar las diferentes -

...//.....

formas geomórfico-fluviales, entre otros es de mencionar: las condiciones climáticas, cobertura vegetal, ambiente geológico, fisiografía y la actividad de los seres vivos.-

El desarrollo de la red de drenaje en una cuenca se inicia con la concentración del escurrimiento superficial en diminutos cursos de escorrentía que al ir juntándose en la dirección en que disminuye el gradiente topográfico, producen un sistema conectado de canales que puede adoptar diferentes morfologías según los factores antes mencionados; así se producen patrones dendríticos de erosión en áreas con características litológicas homogéneas, los de tipo paralelo o radial reflejan condiciones estructurales ó geomórficas del sistema físico. El desarrollo, crecimiento y evolución de los canales implica la remoción y transporte en dirección aguas abajo de enormes cantidades de sólidos que se acarrean en dos formas: como partículas discretas conocidas en su conjunto como el sedimento fluvial o también como material disuelto. Este mecanismo en la naturaleza, es el responsable de que se formen depósitos aluviales que llevan al desarrollo de acuíferos en los fondos de valles, suelos fértiles útiles para la agricultura en las márgenes y planicies fluviales, deltas y depósitos de relleno en cuencas que son almacenadores potenciales de minerales, aguas, gases y otros recursos necesarios para el desarrollo. Los depósitos Cuaternarios del piedemonte de los Altos Llanos occidentales de Venezuela, tienen un enorme potencial hidrogeológico al igual que canales antiguos de relleno en los llanos al sur del Guárico y Anzoátegui, los depósitos de petróleo de las cuencas sedimentarias de Venezuela se desarrollaron en depósitos de activa sedimentación y relleno, nuestros más fértiles suelos de zonas de piedemonte y deltaicos aprovechados en un bajo margen de sus capacidades productivas, prosiguen actualmente su desarrollo y enriquecimiento, a costa del suministro de sedimentos por los sistemas fluviales. (planicies marginales y Delta del Orinoco, zona Sur del Lago de Maracaibo etc.).-

Más no todos los efectos derivados de la erosión y transporte sólido por los ríos, son venturosos. Desde el mismo instante que el impacto de las gotas de lluvia se produce contra el suelo, la remoción de la capa superficial conlleva a su empobrecimiento en nutrientes y minerales que definen la calidad edáfica y condicionan la sustentación de la vida vegetal. Estos horizontes superficiales del suelo, se desarrollan en largos períodos de tiempo que requieren procesos naturales continuos y los cuales pueden ser removidos en relativamente cortos intervalos de tiempo si no existen las condiciones protectivas adecuadas. En muchas cuencas se han reportado incrementos bruscos de la erosión y del transporte hasta de 50.000 veces en suelos intervenidos artificialmente.-

...//.....



En forma rutinaria, las oficinas hidrológicas se ocupan de practicar mediciones con instrumentos adecuados como los de la serie USD (puntuales integradores, Fig A) en los ríos, embalses y otros cuerpos de agua donde se contempla este aspecto. - Así, los embalses se diseñan con una vida útil que depende de su capacidad y de la cantidad de aportes sólidos suministrados por las corrientes fluviales. -

En ausencia de mediciones es necesario estimar, usando técnicas de simulación correlación estadística ó analizando características diversas del medio físico, - las ratas medias de denudación ó transporte, que lleven a definir el comportamiento en las relaciones entre los aportes sólido-líquidos en un canal. -

Mientras que son diversas y complejas las variables que condicionan el transporte, es necesario considerar aquellas que son relevantes y de mayor importancia como causas del suministro y transporte sólido. Cuando se practican mediciones rutinarias de caudales simultáneamente con los muestreos de sedimentos, no es difícil hacer determinaciones aproximadas del arrastre sólido total. Si muchos factores hidroclimáticos e hidrológicos son análogos, entonces es factible además, extrapolar o regionalizar datos de acarreo sólidos dentro de áreas que abarquen sistemas de cuencas, con índices similares de producción de sedimentos. Modelos teóricos deducidos estadísticamente que definen esta productividad de sólidos, pueden ser deducidos y aplicados con cierta generalización a áreas específicas. Estos pueden adoptar formas de polinomios cuya estructura general es del tipo:

$$P = K + AX_1 + BX_2 + CX_3 + \dots + RX_n \dots \dots \dots (2)$$

Donde P la producción unitaria de sedimentos

$X_1, X_2, X_3 - X_n$  - variables independientes (escurrimientos, tipo y densidad de vegetación, área de la cuenca, precipitación, pendiente, factor de laboreo de la tierra, etc). -

$K, A, B, C, \dots, R$  - coeficientes regionales característicos de cada cuenca ó región. -

Así la ecuación "Universal" de la erosión propuesta por WISCHMEIR - (1959) aplicable a una región dada para obtener el módulo de producción de sedimentos (pérdida de suelos) es de la forma:

...//...

$$P = K X_1 X_2 X_3 X_4 \dots\dots\dots ( 3 )$$

donde K es un factor de erodabilidad regional .-

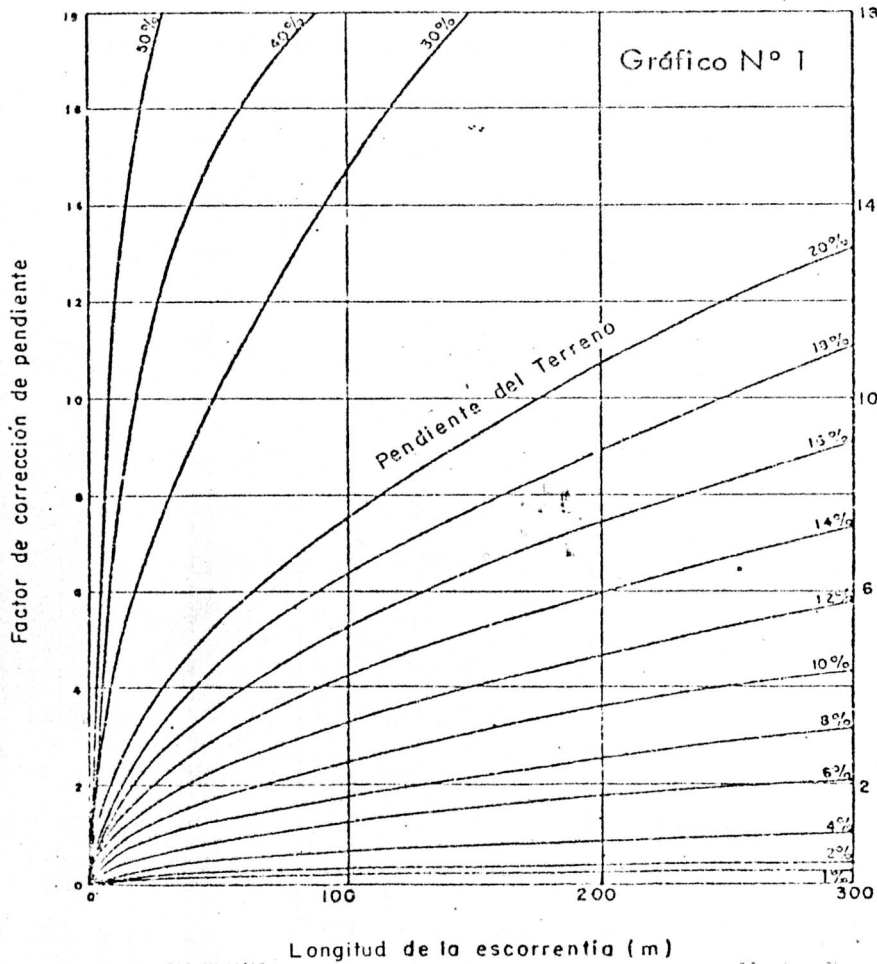
$X_1$  - Factor dependiente de la precipitación (intensidad).-

$X_2$  - Factor dependiente de erodabilidad del suelo (cohesión, permeabilidad, porosidad, etc).-

$X_3$  - Factor dependiente del gradiente de energía (pendiente, topografía, etc).-

$X_4$  - Factor dependiente del tipo de tratamiento de la tierra .- (tipo de cultivos, terráceo, vías de drenaje etc).-

Ajuste de la ecuación de erosión universal debido a la corrección por pendiente



La consideración de estos modelos u otros más racionales puede llevar a la posibilidad de simular los procesos de erosión y el transporte sólido, en la misma forma como es simulado el ciclo hidrológico en una cuenca, mediante el uso de computadores u otros medios. Es obvio sin embargo, que en este caso la complejidad de las variables y su diversidad es mucho mayor; estando en la habilidad del profesional deducir cual es el orden de estas relaciones además de dar significado matemático a estas interrelaciones y definir la importancia de las mismas durante el proceso de modelaje. No existe actualmente, aunque se han hecho avances (Stanford Watershed Model IV) significativos en este campo, un modelo físico ó matemático para reproducir indirectamente el proceso completo de la erosión y transporte de los sedimentos por los ríos, lo cual es comprensible de la visualización del siguiente esquema simplificado a alto grado, como puede concebirse este mecanismo de carácter tan complejo:

$$P = f(S, A, P, V) \dots\dots\dots (3)$$

Donde: P - Producto final (producción sólida)

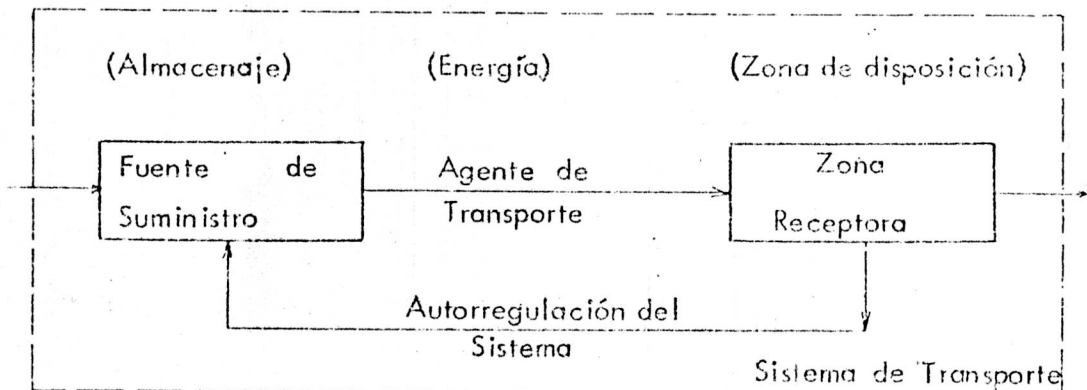
S - Suministro (geología de la cuenca, fisiografía, áreas intervenidas, - potencial de erodabilidad etc).-

A - Almacenaje (deposición, derrames laterales, acrección, etc).-

P - Pérdidas (relleno, trasbases, consolidación del sedimento, etc).-

V - Variables adicionales (geométricas, hidráulicas, climáticas, tiempo, etc).-

En forma esquemática el proceso de erosión y transporte sólido en un área ó medio específico puede visualizarse en la siguiente forma conceptual:

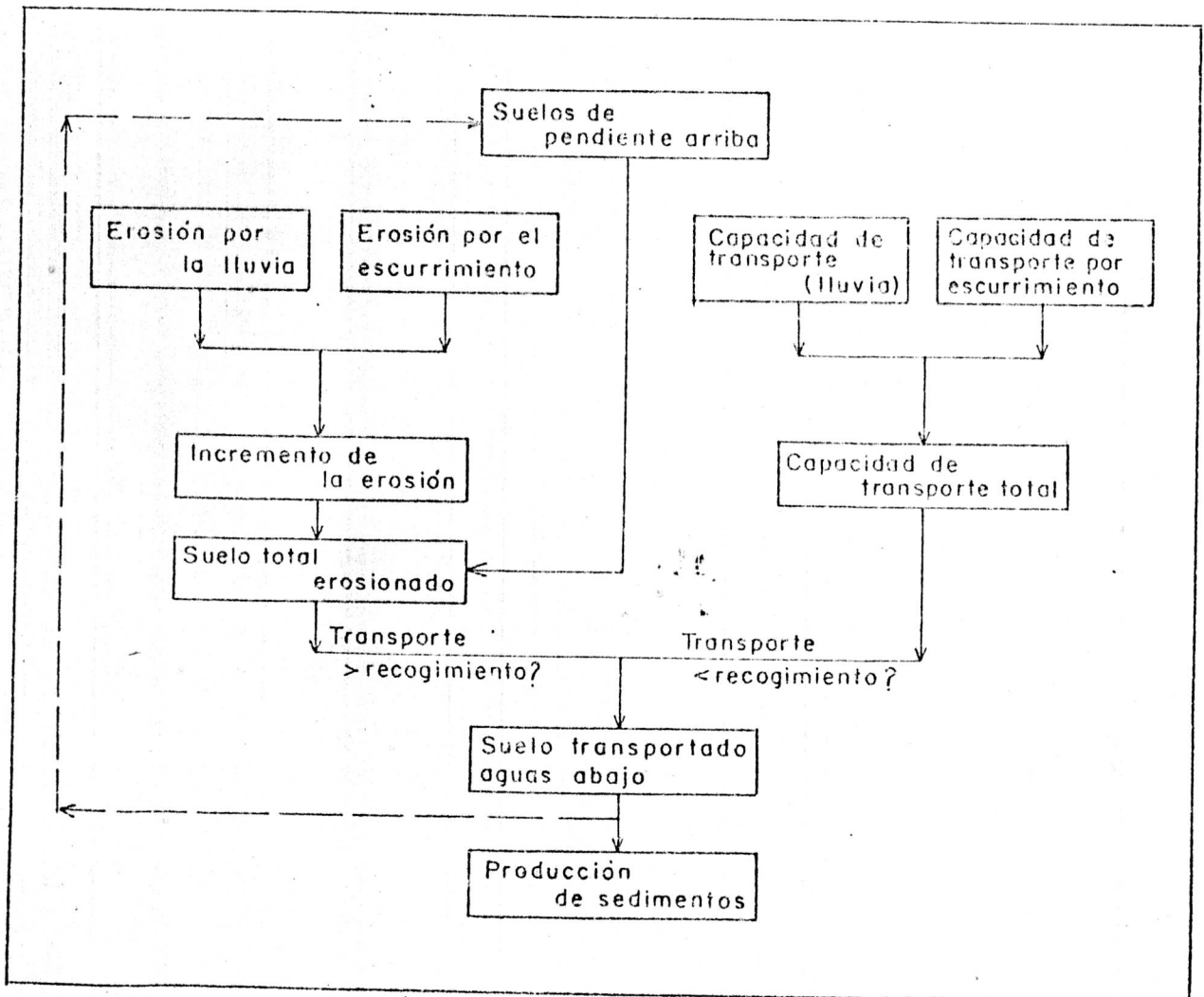


Croquis A

Modelos de erosión y transporte de sedimentos como el ilustrado en el gráfico N° 2, han sido propuestos para considerar los diferentes procesos involucrados durante la erosión y el transporte de sólidos por el agua, el mostrado se fundamenta en la relación entre la capacidad de transporte de un canal y la productividad de sedimentos por acción de la lluvia y el escurrimiento, siendo modelado el proceso - para cada tramo fluvial, para considerar nuevas propiedades físicas y características de los mecanismos activadores de la erosión.-

GRAFICO N°2

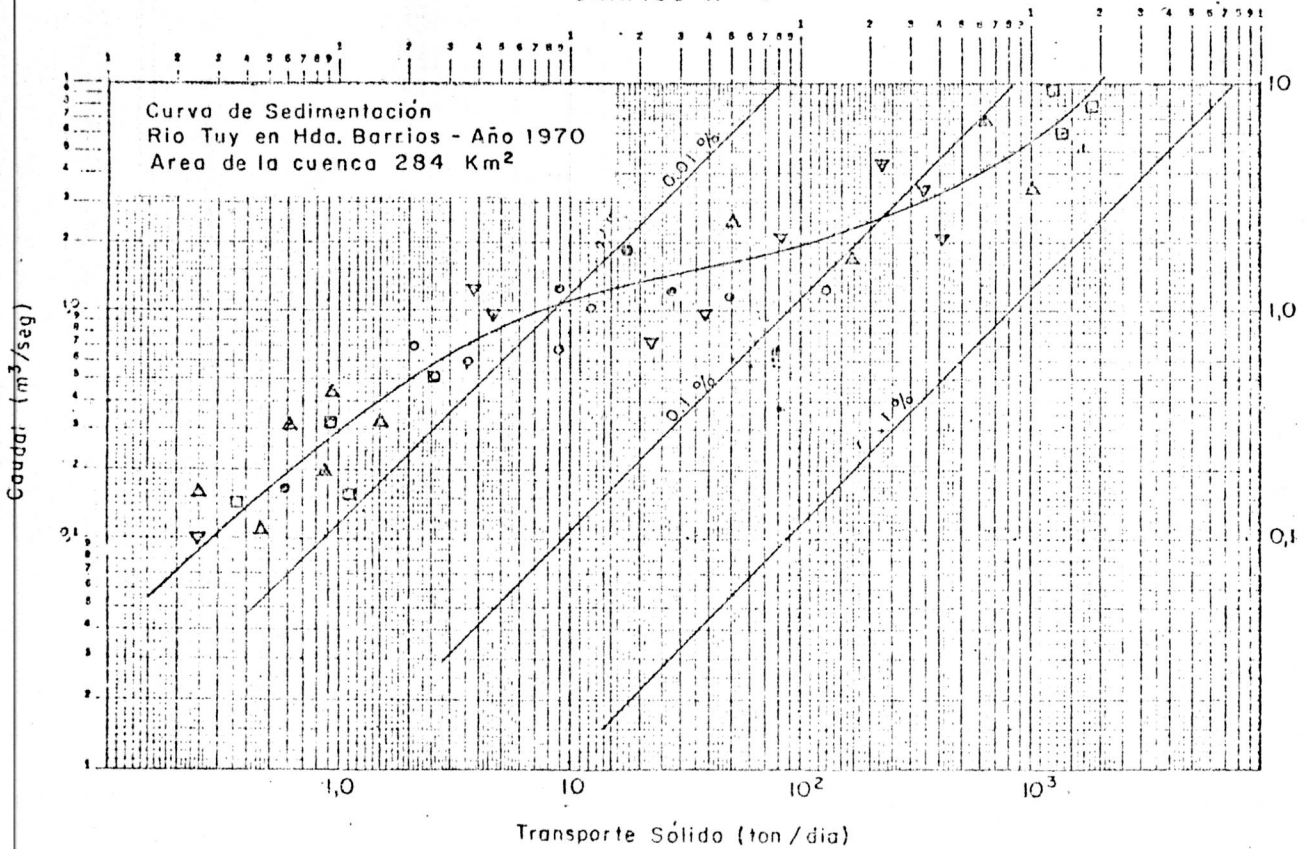
MODELO CONCEPTUAL SIMPLIFICADO DEL PROCESO DE EROSION Y TRANSPORTE DE SOLIDOS POR EL AGUA.- (Meyer-Wischmeier, 1969)



### CALCULO DEL TRANSPORTE SOLIDO:

Antes de señalar la metodología seguida para evaluar el transporte sólido debe diferenciarse entre los conceptos de acarreo medido y no medido en un canal. El primero es el obtenido por el uso de instrumentación que permita realizar captaciones en la sección e incluye parte del transporte del sedimento que se mueve como acarreo de lecho, mientras que el no medido corresponde a aquella fracción de la descarga sólida que se mueve en ó cerca del lecho y que no puede ser muestreada con equipos de uso convencional, aunque sí puede estimarse mediante diversas ecuaciones apropiadas de descarga de acarreo de lecho; como son por ejemplo el método de Einstein, Peter-Muller, Shield y otros. Cuando el último se determina empleando muestreadores de lecho, se hace necesario realizar calibraciones de estos aparatos tanto en el campo como en los laboratorios, se tiene así lo conocido como eficiencia de muestreo, que se define como la razón entre el transporte del sedimento que se mueve en un intervalo de tiempo en una sección del lecho con ancho equivalente al del instrumento respecto al gasto sólido medido durante ese período en el instrumento, cuando él es colocado en el lecho.-

GRAFICO Nº 3



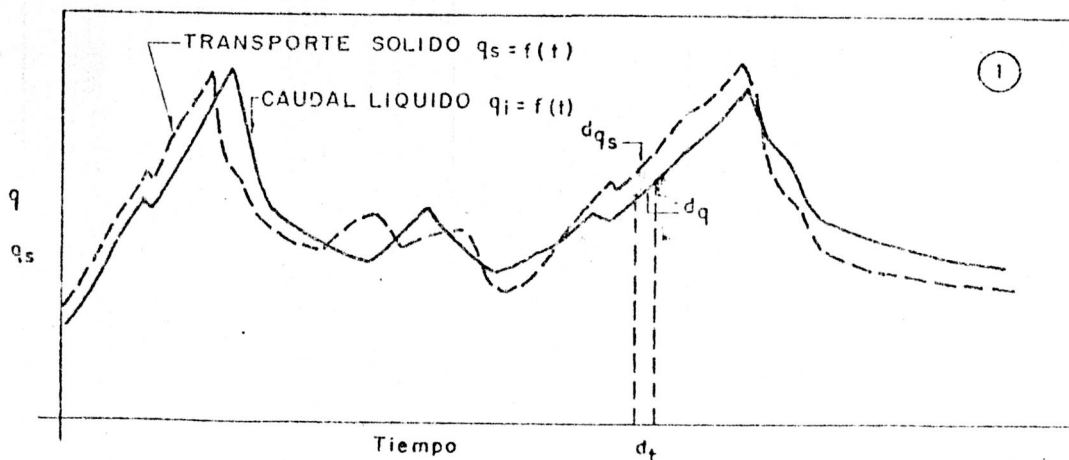
El proceso de determinar el transporte sólido de una sección del río requiere se representen curvas de sedimentación del período considerado como se ilustra en el gráfico N° 3, estas curvas varían dependiendo de los factores climáticos y físicos de las cuencas, del tipo de transporte y son características de cada sección y río en particular, obedeciendo a ecuaciones exponenciales de la forma:

$$Q_s = K Q^n \quad \text{con } 3.0 > n > 2.0 \dots \dots \dots (5)$$

Debido a las distintas fuentes de suministro y las diversas condiciones hidrológicas y meteorológicas que prevalecen en las cuencas, es normal que se registren notables variaciones en el transporte y las concentraciones del sedimento para un mismo caudal, así que estas curvas ofrecen distintos grados de correlación en niveles bajos, medios y altos del río, siendo en muchos casos muy pobre, particularmente en bajos caudales y realmente difíciles de definir, para condiciones altas de transporte, especialmente causados por eventos hidrológicos extremos y ocasionales como deslizamientos, derrumbes, etc.-

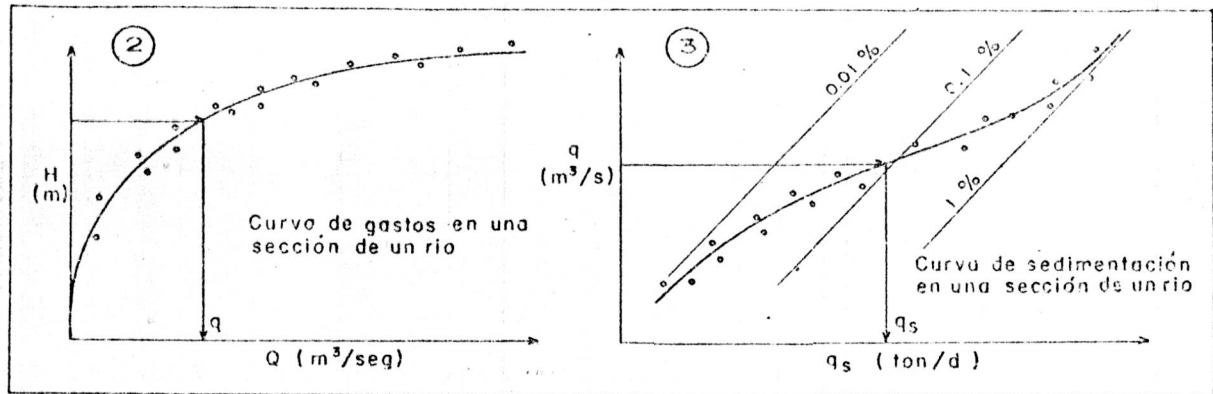
Gráficos como el 4, que ilustran la variación del caudal sólido y líquido con el tiempo, son útiles y convenientes de ser representados como información adicional para definir las características del transporte y sus relaciones con la escorrentía.-

GRAFICO N° 4



Variación del caudal líquido y el caudal sólido en una sección genérica de un río.

También es necesario establecer y conocer previamente las curvas de caudales en la sección; gráficos que relacionan el caudal ( $m^3/seg.$ ) con el nivel del río en la sección (m), estas relaciones se definen de las bandas limnimétricas ó con mediciones directas en la sección de aforos. -



Relaciones básicas para los cálculos de escurrimiento y transporte sólido en un río.

Mientras que no es posible definir el transporte medio diario con suficiente precisión- dado que la concentración del sedimento muestra normalmente en un río, - mayor variabilidad durante cortos intervalos de tiempo que los niveles o el caudal líquido en la sección, es necesario practicar un mayor número de mediciones del sedimento y los caudales líquidos, para definir apropiadamente las curvas de sedimentación, ello impone el análisis de concentraciones y granulométricos del sedimento en el laboratorio para definir sus características, así como la relación gravimétrica ó volumétrica entre ambos. A la concentración del sedimento, se define como la relación en peso ó volumen - de las partículas sólidas contenidas en una muestra en relación al peso ó volumen de la mezcla de agua y sedimento y puede expresarse en % peso, gr/lit,  $Kg/m^3$ , etc. Así:

$$C_m = \frac{\text{Peso sedimento seco}}{\text{Peso de la mezcla (agua + sedimento)}} \dots\dots\dots (6)$$

y el gasto sólido -  $q_s$  - medido en la sección del cauce ó canal es:

$$q_s = C_m \times q \dots\dots\dots (7)$$

....//....

CUADRO Nº 1

TRANSPORTE DEL SEDIMENTO MEDIDO

RIO TUY EN HACIENDA BARRIOS AREA DE LA CUENCA = 248 KM2

1970

MES	GASTO MEDIO (MB/SEG)	VOLUMEN MENSUAL (MILLON M3)	LAMINA (MM)	ACARREO MENSUAL (TONX1000)	CONC (O/O)
ENE	0.38	1.03	4.1	0.04	0.004
FEB	0.28	0.82	2.5	0.02	0.004
MAR	0.43	1.14	4.6	0.06	0.006
ABR	0.21	0.54	2.2	0.02	0.004
MAY	0.36	0.95	3.8	0.05	0.005
JUN	1.85	4.82	19.4	3.22	0.067
JUL	1.99	5.34	21.5	4.37	0.082
AGO	1.63	4.36	17.6	1.92	0.044
SEPT	1.89	4.79	19.3	3.13	0.065
OCT	1.17	3.13	12.6	1.87	0.044
NOV	0.78	2.03	8.2	0.43	0.021
DIC	0.39	2.39	9.7	0.55	0.040

GASTO MEDIO ANUAL = 0.99 MD/SEG  
 VOLUMEN ANUAL = 31.154 MILLONES DE M3  
 LAMINA ESPELDA = 125.62 MILIMETROS  
 ACARREO ANUAL = 15.6 MILES DE TONELADAS  
 RENDIMIENTO ANUAL = 62.8 TON/KM2  
 CONC. MEDIA ANUAL = 0.050 (O/O)  
 ARENA 8 10-25 LIMO 8 70-72 ARCILLA 8 5-15

RIO: Tuy EN: HACIENDA BARRIOS AREA: 248 KM2  
 PERIODO: 1970 Nº DE DIAS: 365

①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
LIMITE %	INTERVALO %	ORD. MEDIA %	GASTO T/SEG	SEDIMENTO TON/DIA	⑥ : ⑤	⑦ : ⑥
0,00 - 0,02	0,02	0,01	5,75	1,191,00	0,0014	0,202
0,02 - 0,1	0,067	0,03	6,30	1,177,00	0,0020	0,039
0,1 - 0,5	0,4	0,3	5,40	950,00	0,0016	3,810
0,5 - 1,5	1,0	1,0	4,40	649,00	0,0040	6,490
1,5 - 5,0	3,3	3,25	3,45	405,00	0,1203	14,175
5,0 - 15,0	10,0	10,0	2,50	705,00	0,2000	10,500
15,0 - 25,0	10,0	20,0	1,55	48,00	0,1050	4,800
25,0 - 35,0	10,0	30,0	1,40	28,00	0,1400	0,500
35,0 - 45,0	10,0	40,0	1,15	8,00	0,1050	0,950
45,0 - 55,0	10,0	50,0	0,85	3,00	0,1050	0,050
55,0 - 65,0	10,0	60,0	0,80	2,10	0,0510	0,010
65,0 - 75,0	10,0	70,0	0,38	1,05	0,0300	0,105
75,0 - 85,0	10,0	80,0	0,24	1,95	0,0240	0,095
85,0 - 95,0	10,0	90,0	0,20	0,10	0,0020	0,030
95,0 - 99,5	3,5	99,75	0,15	0,45	0,0030	0,015
99,5 - 99,9	0,4	99,7				
99,9 - 99,99	0,03	99,94				
99,99 - 100,00	0,02	99,99				

Σ ⑤ = 9m Gasto medio diario TOTAL 1,00  
 Σ ⑦ = 8m Acarreo medio diario 45,21

N = NUMERO DE DIAS DEL PERIODO = 365  
 V = VOLUMEN MEDIO ESCURRIDO = 31,154 MILLONES DE M3  
 S = ACARREO MEDIO EN SUSPENSION = 15,6 MILES DE TONELADAS  
 S = VOLUMEN DE SEDIMENTOS EN SUSPENSION = 14,7 MILES DE M3  
 CONCENTRACION EN PIEDRA = 0,050

El proceso para determinar el acarreo durante un período dado consiste - entonces, en determinar el caudal medio diario de las bandas limnimétricas los cuales al aplicarse a la curva de sedimentación, determinan el acarreo calculado. Si hacemos esto para todos los días del lapso de interés, obtendremos por sumatoria de los gastos sólidos parciales, el acarreo medido del período considerado ó sea:

$$Q_T = n \sum q_s \dots \dots \dots (8)$$

n - número de días del período

q<sub>s</sub> - caudal sólido medio

Este es un trabajo tedioso si se procede de ésta manera y por lo tanto, es necesario, bien adoptar un método automático de computación ó elegir un procedimiento alternativo que simplifique las operaciones. El diagrama de flujo (Gráf. N°6) muestra el esquema para usar el procedimiento automático\* al realizar éstos cálculos, ilustrándose adicionalmente la forma de la entrada y salida del programa -SEDIN- usado por la Dirección de Hidrología del M.A.R N.R. Cuadros N° 1 y 2.-

El segundo procedimiento hace necesario se preparen curvas de duración de gastos: esto es, curvas de frecuencias que muestran la distribución y la variabilidad - anual de los gastos medios diarios, las cuales al aplicarse a las curvas de sedimentación-

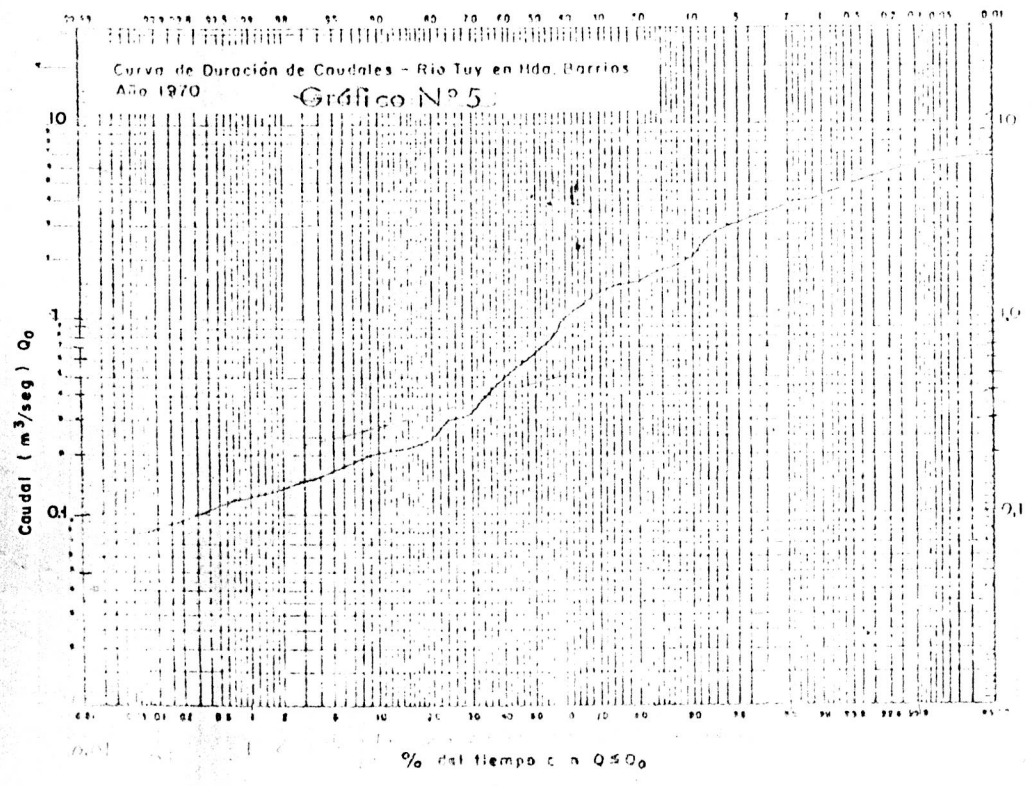
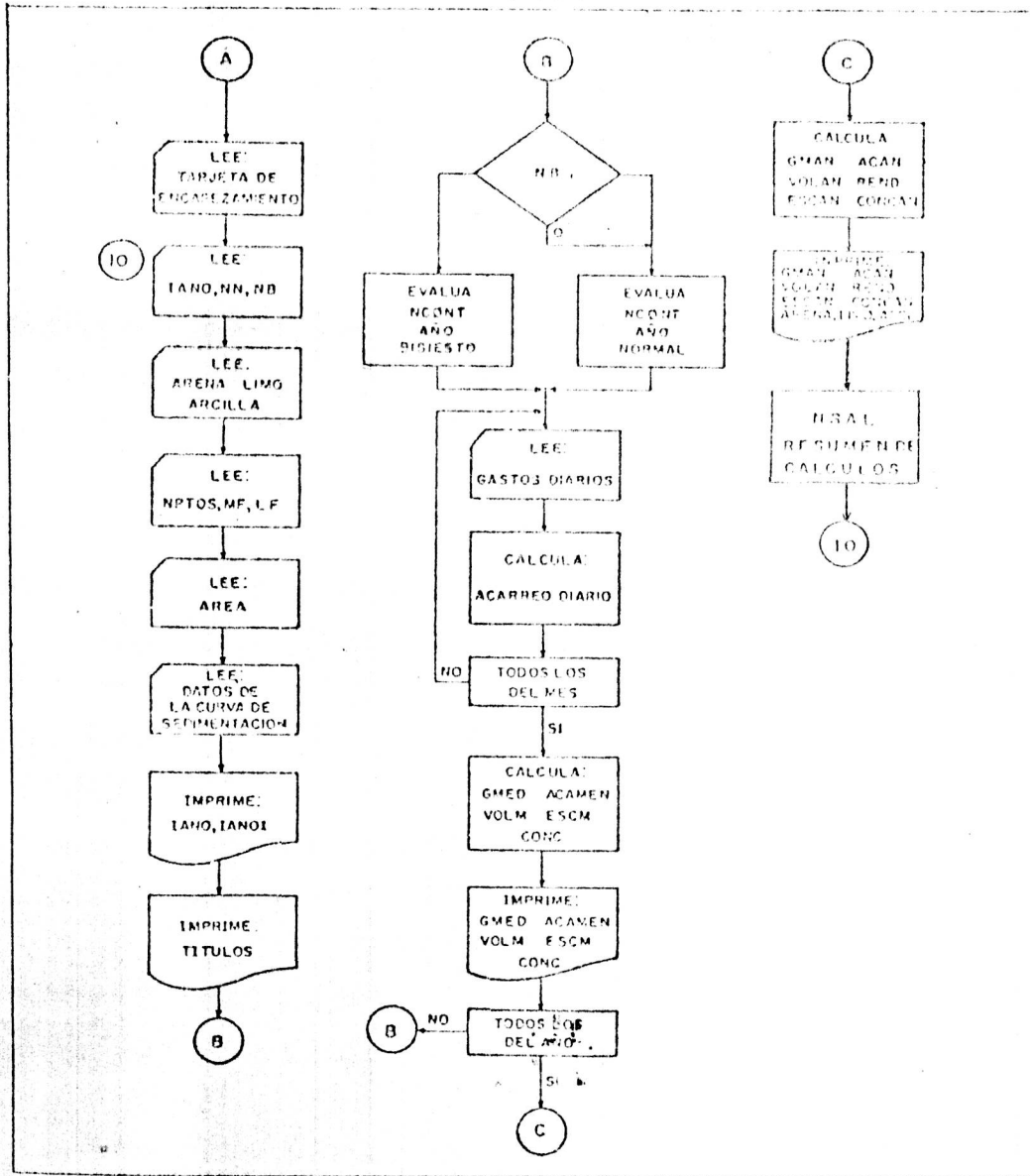


DIAGRAMA DE FLUJO  
— SEDIN —



puesta una apropiada correlación entre los gastos sólidos-líquidos, permiten conocer el acarreo medio diario y el acarreo sólido, al evaluar las áreas encerradas por las curvas de frecuencias acumulativas ó sea:

$$q = \int_0^{100} q dt = \int_0^{100} f(t) dt \dots\dots\dots(9)$$

$$q_s = \int_0^{100} q_s dt = \int_0^{100} f'(t) dt \dots\dots\dots(10)$$

y las magnitudes calculadas para un período dado son:

$$V = n\bar{q} = n \int_0^{100} f(t) dt \dots\dots\dots (11)$$

$$V_s = n\bar{q}_s = n \int_0^{100} f'(t) dt \dots\dots\dots (12)$$

De las cuales es factible determinar la concentración media del sedimento y el volúmen del depósito sólido, si se conoce el peso unitario del sedimento (ton/m<sup>3</sup>). -

«Uno y otro método poseen ventajas obvias de la comparación de los resultados obtenidos, el primero es más rápido y preciso, permite definir valores de períodos parciales (meses, semanas etc.), así como de concentraciones medias parciales, en adición se obtienen los reportes tabulados con información adicional sobre el transporte sólido y el escurrimiento como son: producciones unitarias (ton/km<sup>2</sup>), lámina escurrida y de erosión (mm), composición granulométrica del sedimento etc. -

#### ALGUNAS RELACIONES ENTRE LA PRODUCCION DE SEDIMENTOS Y FACTORES CLIMATICOS Y DEL MEDIO FISICO.

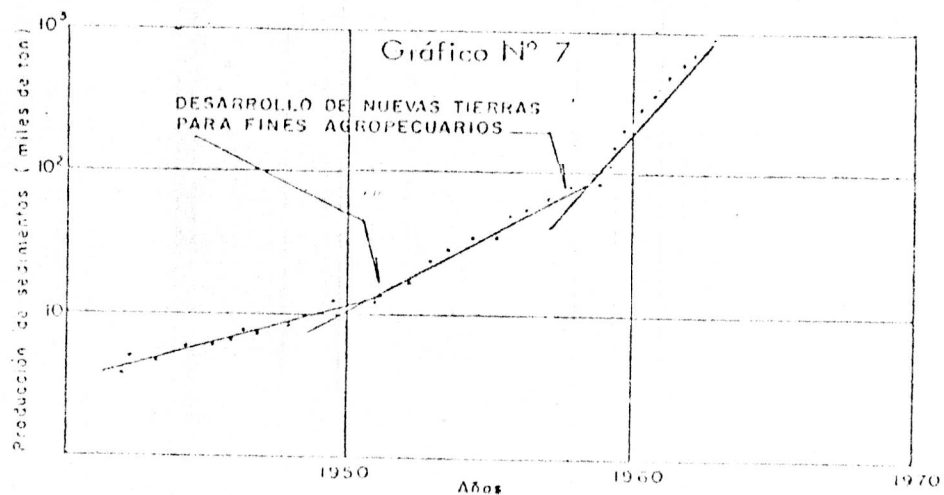
La producción de sedimentos en una cuenca ó el transporte de sólidos en un canal natural, está relacionado como se vió antes, con múltiples variables independientes, las cuales pueden tener mayor ó menor significancia de una a otra región, dependiendo del comportamiento climático, las condiciones geológicas y el estado ó naturaleza de los agentes de transporte. Así no es factible lograr generalizaciones que diagnóstiquen en cualquier medio, bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas, cual es la importancia de una variable determinada; a menudo, ellas operan con diferentes intensidades dependiendo de sus interrelaciones y relevancias. El tipo de sedimento (ligado a la fuente de suministro, vegetación, geología, etc) puede afectar distintamente a la magnitud del transporte; si se trata por ejemplo, de un río de altas pendientes con régimen torrencial ó si la escorrentía es generada por lluvias de moderadas a alta intensidad, por ejemplo. -

En muchos casos sin embargo, especialmente cuando se carece de mediciones hidrológicas, es necesario hacer correlaciones entre las diferentes variables obtenión

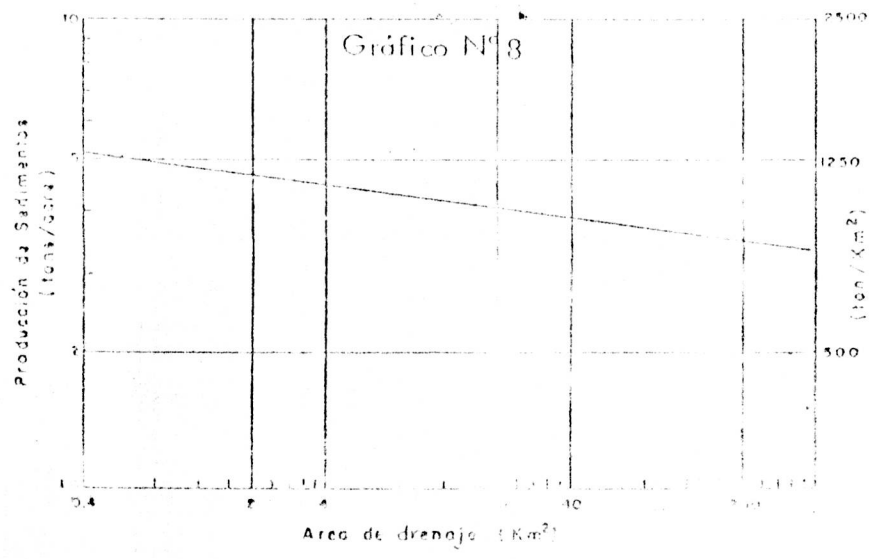
...//....

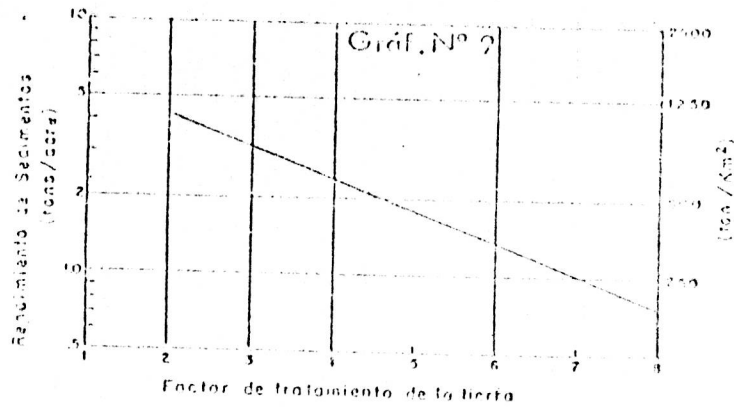
dose las configuraciones generales mostradas en las figuras 7, 8, 9, 10 y 11. Con estos diagramas se logran obtener rendimientos de sedimentos factibles de regionalizarse y ser aplicados a casos particulares de cuencas, donde no se dispone de suficiente información.

Los gráficos N° 12 y 13 contienen algunas relaciones deducidas de mediciones de campo en muchas cuencas hidrográficas, en las cuales una variable asociada al transporte y suministro de sedimentos es considerada. Para ilustrar el comportamiento de algunas cuencas agrupadas dentro de una región con aceptables similitudes geológicas y climatológicas, se ilustran datos de cuencas del frente de montañas de los Andes de Venezuela en su transición hacia los llanos occidentales, las cuales muestran aceptables correlaciones lineales a escala logarítmica. -

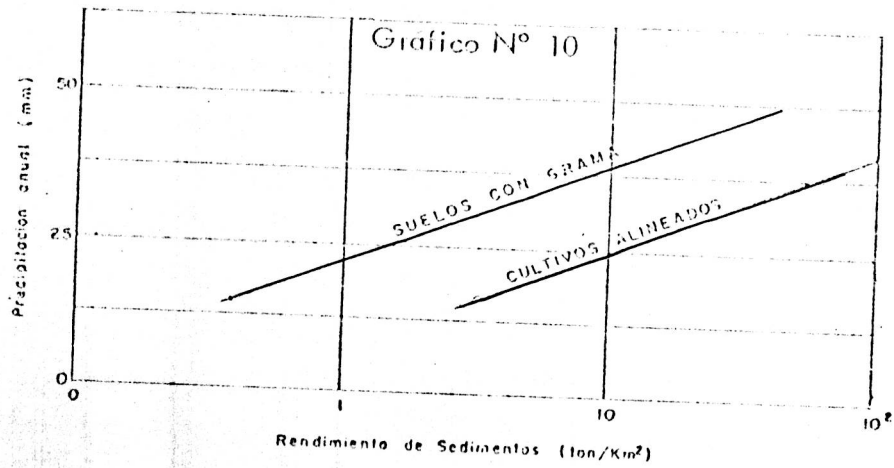


Efectos del desarrollo de nuevas tierras sobre la erosión y la producción de sedimentos en cuencas hidrográficas

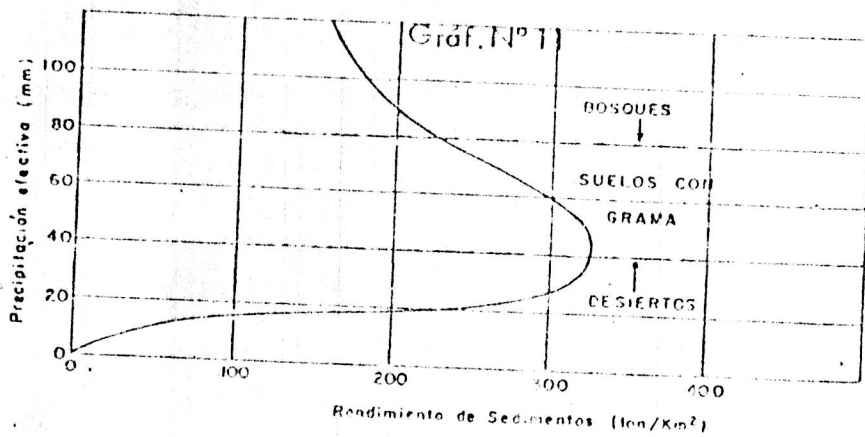




Formas como afecta la protección vegetal de los suelos a la producción de Sedimentos y la erosión



Efecto de los cultivos y la precipitación sobre la producción de sedimentos en cuencas naturales (schumm)



## PROCESOS EROSIONALES Y GEOMORFOLOGIA

Todas las formas geomórficas del relieve terrestre son el resultado de la acción de un conjunto de procesos dinámicos que operan a distintas escalas de intensidad en el tiempo y con variables distribuciones espaciales. Los agentes que sirven de activadores de tales procesos pueden ser endógenos (tectónica, compactación) como exógenos aquí se incluyen el viento, el agua, el hielo y hasta las mismas rocas fundidas (lavas volcánicas). Durante la génesis y evolución de las formas terrestres derivadas de la acción eólica, es la energía radiacional solar quien activa el proceso, mientras que en las últimas, la fuerza gravitacional es la responsable del comportamiento del sistema. Obviamente, no es suficiente que exista la fuente de energía en tipo y magnitud suficiente para que el relieve adopte una estructura dada, es además necesario que las propiedades de los materiales y los ambientes tanto de suministro, como de deposición, ofrezcan aptitudes apropiadas para la génesis de una forma específica.

La resistencia de los materiales condicionada por sus propiedades físico-químicas (cohesión, grado de anisotropía, composición mineralógica etc) es responsable a veces en forma dominante de la evolución de las formas ó de la diversidad de las estructuras evolutivas, aún dentro de una misma región.

La operación de tales mecanismos dentro de distintas escalas de tiempo para determinar paisajes ó formas particulares, es algo que siempre ha impresionado de distinta manera a muchos investigadores en la ingeniería y de las Ciencias de la Tierra, observándose formas geomórficas majestuosas por su desarrollo espacial que han tomado a la naturaleza millones de años para su evolución como son el Gran Cañón de Colorado, los prominentes tepuyes de la Gran Sabana, nuestros grandes sistemas de montañas o aquellos que por su breve lapso de tiempo de ocurrencia, producen cambios intespectivos como son los derrumbes, deslizamientos, coladas de lavas, movimientos glaciáricos etc.

En virtud de la abundancia y distribución de la Hidrósfera con respecto a otros componentes de nuestro planeta, el agua es el más activo agente de meteorización, erosional y de transporte. Es imposible desvincular en algún medio físico las formas resultantes de su acción y efectos, ya sean directos ó indirectos.

Lo anterior es una consecuencia de las especiales propiedades físico-químicas del agua, la cual ejerce una influencia sobre los otros materiales con las cuales está en contacto. Estas fuerzas se manifiestan tanto a nivel molecular como a través de esfuerzos (tractivos, friccionales) a mayor escala física, de manera que cuando se estudian las formas geomórficas y sus diferentes estados evolutivos es indispensable obviamente, involucrarse con la consideración de el espacio y el tiempo y aún cuando ellos son visualizados distintamente por diferentes profesionales, es de señalar que tanto las escalas megascópicas como las de menor magnitud así como los procesos que ocurren en cortos ó largos períodos de tiempo, tienen una gran significación e importancia en la evolución de las formas y ellas deben ser analizadas e interpretadas con un criterio que permita y lleve a una comprensión unificada de la naturaleza. Este es uno, quizás el más grande objetivo de la Geomorfología.